

555926

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
25 novembre 2004 (25.11.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/101436 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
C01G 23/00

(74) Mandataires : SUEUR, Yvette etc.; 109, boulevard
Haussmann, F-75008 Paris (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/001038

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(22) Date de dépôt international : 29 avril 2004 (29.04.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
03/05619 9 mai 2003 (09.05.2003) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel-Ange, F-75016 Paris (FR).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : BROHAN, Luc [FR/FR]; 13, allée des Mûriers, Le Petit Portricq, F-44240 La Chapelle Sur Erdre (FR). SUTRISNO, Hari [ID/ID]; Faculty of Science, University of Yogyakarta (UNY), Karangmalang, 55281 Yogyakarta (ID). PUZENAT, Eric [FR/FR]; 2, allée de l'Erdre, F-44000 Nantes (FR). ROUET, Annabelle [FR/FR]; 111, rue Laplace, F-85000 La Roche Sur Yon (FR). TERRISSE, Hélène [FR/FR]; 40, rue des Maraîchers, F-44300 Nantes (FR).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(54) Title: TITANIUM AQUO-OXO CHLORIDE AND PREPARATION METHOD THEREOF

(54) Titre : AQUO-OXO CHLORURE DE TITANE, PROCEDE POUR SA PREPARATION

(57) Abstract: The invention relates to a titanium aquo-oxo chloride and to a method of preparing same. The inventive compound takes the form of crystals and has the following mass composition: Ti 26.91 %, Cl 21.36 %, H 4.41 %, which corresponds to formula $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8\text{HCl}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. The preparation method consists in hydrolysing TiOCl_2 either in an atmosphere having a moisture content which is maintained between 50 and 60 %, or by an alkaline carbonate A_2CO_3 , in order to obtain a titanium aquo-oxo chloride. The compound can be used as a semi-conductor element for a photovoltaic cell or as a photocatalyst in air- or water-purification treatment processes.

(57) Abrégé : L'invention concerne un aquo-oxo chlorure de titane, et un procédé pour sa préparation. Le composé est sous forme de cristaux et présente la composition massique suivante : Ti 26,91%, Cl 21,36%, H 4,41%, qui correspond à la formule $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8\cdot\text{HCl}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Le procédé de préparation consiste à hydrolyser TiOCl_2 soit dans une atmosphère dont le taux d'humidité est maintenu entre 50 et 60%, soit par un carbonate alcalin A_2CO_3 , pour obtenir un aquo-oxo chlorure de titane. Le composé est utile comme élément semi-conducteur d'une cellule photovoltaïque ou comme photocatalyseur dans les traitements de purification de l'air ou de l'eau.

WO 2004/101436 A2

**Aquo-oxo chlorure de titane,
procédé pour sa préparation**

La présente invention concerne un aquo-oxo chlorure de titane, un procédé pour sa préparation, ainsi que diverses applications.

La photocatalyse hétérogène à l'aide de dioxyde de titane sur support est une technique d'oxydation avancée qui trouve des applications notamment dans la dépollution de l'eau et de l'air. Elle repose sur la transformation de molécules à la surface du dioxyde de titane sous l'action d'un rayonnement UV et en présence d'oxygène et d'eau, qui peut conduire à une dégradation totale en éléments simples tels CO_2 , H_2O , NO_3^- . L'efficacité du photocatalyseur dépend de ses propriétés physico-chimiques, sa forme allotropique, sa surface spécifique ou son acidité de surface. L'utilisation du photocatalyseur déposé sur un support permet d'éviter les étapes de filtration pour récupérer le photocatalyseur dans le cas de la dépollution de l'eau ou pour optimiser le contact entre les effluents pollués et le photocatalyseur dans le cas de la dépollution de l'air. Les supports utilisés pour les catalyseurs sont variés. On peut citer les oxydes (par exemple SiO_2 ou Al_2O_3) pulvérulents fibreux ou massifs, les celluloses fibreuses (papiers), les polymères synthétiques et le verre. Une couche de TiO_2 peut être déposée sur un support par un procédé sol-gel, dans lequel on utilise directement une poudre de dioxyde de titane mise en suspension, ou un précurseur tel que le tétrachlorure de titane ou un alcoxyde de titane qui se transforme en dioxyde de titane après un traitement thermique. Selon la source de dioxyde de titane, le dépôt peut être effectué par la technique de trempage-retrait (dip-coating), par pulvérisation (spray-coating) ou par dépôt en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition). L'adhérence de l'oxyde de titane pulvérulent au support est obtenue par l'emploi d'alcoxydes de silicium et/ou de titane sous forme polymérique.

Les films de TiO_2 déposés par voie sol-gel présentent des inconvénients majeurs vis-à-vis de l'abrasion et/ou de la résistance à la corrosion des couches. Ils sont difficiles à obtenir sous forme de revêtements épais ($>1 \mu\text{m}$) sans craquelure. Les films sont généralement assez fragiles et ils ont une faible résistance à l'abrasion. En outre, il existe généralement un effet opposé entre l'adhérence du TiO_2 au support et l'activité photocatalytique spécifique du TiO_2 . Des températures relativement élevées sont nécessaires pour obtenir TiO_2 et atteindre de bonnes propriétés ($T = 350, 450^\circ\text{C}$), mais dans cette gamme de température, on observe une diffusion des ions Na^+ contenus dans le verre utilisé comme substrat vers la couche de TiO_2 . Cette diffusion est néfaste pour l'activité photocatalytique, car les ions Na^+ favorisent la recombinaison des paires électron-trou, et il est donc nécessaire d'interposer une couche barrière, ce qui introduit un surcoût.

Reichmann, et al., [Acta Cryst. (1987), C43, 1681-1683] ont identifié, dans le produit formé par la réaction spontanée de TiCl_4 avec l'humidité de l'air, un composé dont la formule déduite de l'analyse par diffraction de RX sur monocristal est $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8 \cdot \text{HCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Cet oxychlorure se présente sous forme de petits cristaux incolores et irréguliers placés au milieu d'un amas de poudre. De petits cristaux irréguliers ont été isolés du centre des agglomérats et soumis à diverses analyses. La stœchiométrie de ces cristaux correspond à $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8 \cdot \text{HCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, et la structure est construite à partir d'un octamère de titane cubique. Les données relatives à ce composé sont publiées dans la fiche PDF (Powder Diffraction File) 01-078-1628 diffusée par International Centre for Diffraction Data (ICDD) sur le site www.icdd.com. Les paramètres de la maille monoclinique sont les suivants : $a = 20,30580$ (20) Å, $b = 11,71720$ (18) Å, $c = 25,39840$ (15) Å, $\beta = 117,201$ (6)°, et le groupe de symétrie C2/c. Cependant, la présence de nombreuses molécules d'eau dont les facteurs d'occupation ne sont pas des nombres entiers traduit une distribution de composition

et/ou un désordre associé à une mauvaise qualité des cristallites.

Les interactions entre surfaces et les propriétés des interfaces pouvant conditionner les performances des matériaux, le but de la présente invention est de fournir un nouveau procédé de préparation d'un précurseur d'oxyde de titane adapté à la fabrication des dispositifs dans lesquels l'oxyde de titane est sous forme de film sur un substrat, notamment pour la photocatalyse ou pour l'élaboration d'éléments semi-conducteurs.

C'est pourquoi la présente invention a pour objet un procédé de préparation d'aquo-oxo chlorure de titane, l'aquo-oxo chlorure de titane obtenu, ainsi que ses applications.

Le procédé de préparation d'aquo-oxo chlorure de titane selon l'invention consiste à hydrolyser TiOCl_2 soit dans une atmosphère dont le taux d'humidité est maintenu entre 50 et 60%, soit par un carbonate alcalin A_2CO_3 , pour obtenir un aquo-oxo chlorure de titane, désigné ci-après par " Ti_8O_{12} ".

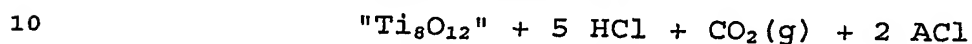
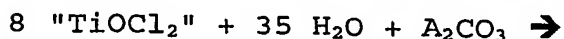
Le composé TiOCl_2 étant très hygroscopique, il est utilisé en solution dans une solution aqueuse concentrée en acide chlorhydrique, c'est-à-dire sous forme d'une solution aqueuse $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$. La concentration en HCl de la solution est avantageusement d'environ 2 M. La concentration en TiOCl_2 dans cette solution est de préférence entre 4 M et 5,5 M. Des solutions commerciales de TiOCl_2 4,3 M ou 5 M dans une solution concentrée de HCl sont disponibles. Le composé $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$ est désigné ci-après par " TiOCl_2 ".

Pour hydrolyser le composé " TiOCl_2 " par maintien dans une atmosphère ayant un taux d'humidité de 50 à 60%, il est particulièrement intéressant de placer une solution de " TiOCl_2 " à température ambiante au dessus d'un mélange $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ dans des quantités respectives telles que l'humidité relative est de l'ordre de 50 à 60% et de laisser en contact pendant environ 5 semaines. La conversion se fait selon le schéma réactionnel suivant :



L'acide sulfurique présent dans le milieu réactionnel permet d'éliminer HCl qui se forme.

Lorsque l'hydrolyse est effectuée par un carbonate, on met en présence à température ambiante une solution de
5 "TiOCl₂" et un carbonate alcalin A₂CO₃ dans des quantités respectives telles que le rapport Ti/A = 4±0,5, de préférence 4±0,1, et on laisse en contact pendant 48 à 72 heures. La conversion se fait selon le schéma réactionnel suivant :



Le composé "Ti₈O₁₂" est obtenu sous forme de cristaux par le procédé de l'invention. Il a la composition massique suivante : Ti 26,91%, Cl 21,36%, H 4,41%, qui correspond à la formule [Ti₈O₁₂(H₂O)₂₄]Cl₈•HCl•7H₂O de l'aquo-oxo chlorure
15 de titane, désigné ci-après par "Ti₈O₁₂".

Ledit composé a une structure monoclinique. Les paramètres de la maille monoclinique sont les suivants : a = 20,3152(11) Å, b = 11,718(7) Å, c = 24,2606(16) Å, β = 111,136(7)°, et le groupe de symétrie est Cc.

20 Le composé "Ti₈O₁₂" est soluble dans les solvants polaires, tels que par exemple l'eau, le méthanol, l'éthanol, etc. Il peut être conservé sous forme "Ti₈O₁₂" dans ces solutions en maintenant le pH à une valeur inférieure à 2, ce qui stabilise le cation [Ti₈O₁₂(H₂O)₂₄]⁸⁺.

25 Des particules monodisperses de "Ti₈O₁₂" dans un solvant polaire peuvent être obtenues en 24 heures en ajustant la force ionique de la solution à une valeur comprise entre 10⁻² et 10⁻³ en Cl⁻. Un exemple de réalisation consiste à introduire dans un solvant polaire, une quantité de "Ti₈O₁₂" telle
30 que la concentration en titane [Ti] soit par exemple 0,1 M, et une quantité de chlorure de métal alcalin telle que la concentration en chlorure [Cl⁻] soit comprise entre 10⁻² M et 10⁻³ M. Dans ces solutions, l'addition d'ions chlorure favorise la dissociation des cristaux de "Ti₈O₁₂" et la disper-
35 sion des clusters dans le solvant polaire, du fait que les ions Cl⁻ entourent le polycation [Ti₈O₁₂(H₂O)₂₄]⁸⁺.

Les solutions ainsi obtenues peuvent être utilisées pour le dépôt de couches minces formées de cristaux sur un

substrat. Le dépôt peut être effectué par les techniques de trempage-retrait, de pulvérisation ou de dépôt en phase vapeur pour tous les types de substrat, par exemple un substrat de verre, ou par électrodéposition lorsque le substrat est un métallique. Les couches ainsi obtenues ont une excellente adhérence aux supports basiques en raison de l'interaction chimique acido-basique entre le polycation chargé positivement $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]^{8+}$ et le support basique, par exemple le verre.

Les solutions de " Ti_8O_{12} " peuvent en outre être utilisées pour la préparation in situ à température ambiante des formes habituelles de TiO_2 , mais aussi de nouvelles variétés dont la dimensionnalité des réseaux et la taille des particules sont contrôlées. Par un contrôle précis du pH et le choix du solvant de la solution contenant le composé " Ti_8O_{12} ", d'autres formes polycondensées (1D, 2D, 3D) d'oxyde de titane peuvent être préparées. Ainsi que mentionné précédemment, le maintien d'une solution de " Ti_8O_{12} " dans un solvant polaire à un $\text{pH} < 2$ conserve " Ti_8O_{12} " sous forme de l'aquo-oxo chlorure de titane du fait que le polycation $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]^{8+}$ est stabilisé. Dans une solution de " Ti_8O_{12} " portée à un pH entre 2 et 3, l'aquo-oxo chlorure de titane subit un début d'hydrolyse et forme un polymère. Lorsque le pH de la solution est entre 4 et 6, c'est-à-dire lorsque la solution tend vers le point de charge nulle, l'aquo-oxo chlorure de titane est hydrolysé pour former des solides 3D. Les particules les plus chargées sont les plus stables et la cinétique de polycondensation est d'autant plus rapide que l'on s'approche du point de charge nulle. Pour ralentir la cinétique, on utilise des solvants dont les constantes diélectriques sont plus faibles ($\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 78,5$; $\epsilon_{\text{Ethanol}} = 24,3$). Le pH d'une solution alcoolique peut être diminué par exemple par addition d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAOH).

Le produit " Ti_8O_{12} " obtenu par le procédé proposé est utile notamment comme élément semi-conducteur d'une cellule photovoltaïque. Un autre objet de la présente invention est constitué par une cellule photovoltaïque dans laquelle

l'élément semi-conducteur est constitué par un aquo-oxo chlorure de titane selon la présente invention.

Le produit selon l'invention est en outre utile comme photocatalyseur dans les traitements de purification de l'air ou de l'eau. L'invention a donc pour autre objet un procédé de purification photocatalytique de l'air dans lequel le catalyseur est un aquo-oxo chlorure de titane selon la présente invention sur support, et un procédé de purification photocatalytique d'effluents aqueux dans lequel le catalyseur est un aquo-oxo chlorure de titane selon l'invention sur support. Pour cette application, il est particulièrement préféré d'utiliser des solutions monodisperses dans lesquelles le diamètre des particules est voisin de 2 nm, (0D), ce qui augmente de façon considérable la surface spécifique.

La présente invention est décrite plus en détail par les exemples donnés ci-après, auxquels elle n'est cependant pas limitée.

Les supports utilisés pour les dépôts de couches de "Ti₈O₁₂" sont des plaques de verre nettoyées au préalable à l'aide d'une solution de RBS diluée à 2% dans l'eau pure. La solution de RBS, commercialisée par la société Saint Gobain, est une solution alcaline contenant des éléments tensio-actifs anioniques, des phosphates, des hydrates et des agents chlorés.

Exemple 1

Préparation de "Ti₈O₁₂"

On a placé à température ambiante, quelques millilitres d'une solution aqueuse de TiOCl₂•yHCl (5,5 M) dans un dessiccateur contenant 500 ml d'un mélange H₂SO₄/H₂O afin de contrôler l'humidité relative. Après plusieurs jours, des cristaux transparents, dont la taille varie entre le millimètre et le centimètre, se sont formés. Les cristaux obtenus sont conservés dans des récipients étanches pour éviter toute dégradation.

Analyse chimique

L'analyse chimique a donné la composition massique suivante : Ti 26,91%, Cl 21,36%, H 4,41%. Elle correspond à la formulation $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8 \cdot \text{HCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de l'aquo-oxo
 5 chlorure de titane.

Analyse par diffraction des rayons X

Le composé obtenu a été séché et la poudre obtenue a été soumise à une analyse par diffraction des RX. L'analyse du DRX obtenu a été conduite à l'aide d'une maille monocli-
 10 nique centrée C, déterminée pour un composé de formulation $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8 \cdot \text{HCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ par Reichmann et coll, précités. La position des raies de diffraction et leurs intensités intégrées ont été déterminées grâce au programme PROLIX mis au point par J. M. Barbet, P. Deniard et R. Brec, ("PROLIX",
 15 *Treatment of Inel X-ray Curve Detector Powder Diffraction Data : Chains Program and Experimental Results*). L'affinement des paramètres cristallins a été réalisé à l'aide du programme U-FIT décrit par M. Evain, ["U-FIT", *A Cell Parameter Program*, IMN-Nantes (1992)].

20 Si l'on excepte c et β , les paramètres de maille affinés [$a = 20,305(7) \text{ \AA}$, $b = 11,716(6) \text{ \AA}$, $c = 25,390(4) \text{ \AA}$ et $\beta = 115,001(8)^\circ$] sont en bon accord avec ceux obtenus par diffraction sur monocristal [$a = 20,3152(11) \text{ \AA}$, $b = 11,718(7) \text{ \AA}$, $c = 24,2606(16) \text{ \AA}$ et $\beta = 111,136(7)^\circ$]. Les
 25 écarts enregistrés résulte d'un choix de maille sensiblement différent entre l'affinement sur poudre et sur monocristal.

Les facteurs caractéristiques de l'affinement sont l'écart moyen D entre $2\theta_{\text{obs}}$ et $2\theta_{\text{calc}}$, soit $D = \frac{1}{n_{\text{hkl}}} \sum |d(2\theta)| = 0,0108^\circ$ et R , le facteur de confiance donné par la relation suivante :
 30 $R = \frac{1}{n_{\text{hkl}} - n_{\text{var}}} \sum (2\theta_{\text{obs}} - 2\theta_{\text{calc}})^2 = 0,0139^\circ$, où n_{hkl} est le nombre de réflexions prises en compte, et n_{var} le nombre de variables affinées.

L'analyse du DRX montre que l'obtention de « Ti_8O_{12} » est quantitative, aucune raie parasite n'étant identifiée. Les indexations et intensités relatives des raies de diffraction
 35 sont regroupées dans le tableau suivant.

hkl	$2\theta_{\text{obs}}$ (°)	$2\theta_{\text{calc}}$ (°)	Intensité I/I_0
0 0 2	7,820	7,810	100
1 1 0	8,987	8,982	85
-2 0 2	9,348	9,338	34
2 0 0	9,790	9,773	12
-1 1 2	10,349	10,350	43
1 1 2	13,319	13,296	1
0 0 4	15,650	15,656	6
-1 1 4	16,022	16,019	3
0 2 2	17,054	17,023	3
2 2 -1	17,477	17,465	19
2 2 -2	17,793	17,785	7
2 2 0	18,006	18,019	4
2 2 -3	18,963	18,936	4
4 0 0	19,649	19,617	5
3 1 -5	19,918	19,906	4
3 1 2	20,984	20,990	21
1 3 -1	23,242	23,223	74
1 1 5	23,557	23,566	89
1 3 -2	23,846	23,843	34
0 2 5	24,820	24,839	8
1 3 -3	25,070	25,083	28
5 1 0	25,765	25,753	15
1 3 -4	26,872	26,862	78
3 3 1	28,437	28,427	17
1 3 -5	29,091	29,089	5
2 0 6	29,515	29,493	2
0 4 0	30,461	30,475	6
1 1 -8	30,665	30,638	5
3 3 -6	31,379	31,398	4
0 0 8	31,617	31,614	6
7 1 -3	32,013	32,000	11
3 1 -9	32,645	32,648	5
3 1 6	34,120	34,123	4
5 3 1	35,320	35,302	12
8 0 -6	35,830	35,830	4
0 4 5	36,490	36,498	6
5 3 2	37,265	37,251	9
1 3 -8	37,695	37,690	17
5 3 -8	37,980	37,951	5
4 2 -10	38,655	38,658	10
1 1 9	39,108	39,084	3
3 5 -3	41,057	41,034	3

hkl	$2\theta_{\text{obs}}$ (°)	$2\theta_{\text{calc}}$ (°)	Intensité I/I_0
8 0 -10	41,712	41,700	1
2 4 -8	42,191	42,177	3
3 3 -10	42,567	42,543	1
4 2 7	43,942	43,940	4
2 0 -12	44,384	44,374	8
6 2 5	45,738	45,742	3
5 5 -6	46,465	46,451	7
9 3 -4	46,648	46,673	4
10 0 -2	47,124	47,107	10
3 1 -13	47,971	47,967	10
1 3 -11	48,143	48,159	7
4 4 6	48,935	48,919	1
7 3 -12	50,803	50,813	5
5 5 -9	51,403	51,381	1
7 1 -14	51,920	51,887	3
9 1 3	52,738	52,731	11
12 0 -9	54,938	54,955	1
1 5 9	55,332	55,320	5
1 3 -13	55,889	55,873	2
8 4 3	56,943	56,934	4

La figure 1 représente le diagramme de diffraction du composé du présent exemple, superposé au diagramme théorique obtenu à partir des données de la fiche PDF n° 01-078-1628 (correspondant au composé décrit par Reichmann, et al.,
5 précité). Dans le diagramme théorique, les raies sont matérialisées par un simple trait vertical surmonté d'un carré. Il apparaît que les intensités des raies présentent des différences substantielles.

Analyse thermique

10 Le comportement thermique d'échantillons séchés à température ambiante a été étudié par thermogravimétrie (TG) couplée à la calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry, DSC).

15 Les analyses TG et DSC sont effectuées à l'aide d'un appareil SETARAM TG-DSC 111, sur des échantillons d'environ 20 mg, chauffés à une vitesse de 5 K/min ou 2 K/min, sous un flux d'argon. L'identification des gaz dégagés au cours du

traitement thermique se fait grâce à un appareil LEYBOLD H300CIS.

La figure 2 représente les courbes de thermogravimétrie (en trait plein) et les courbes de calorimétrie différentielle à balayage (en pointillé) de la phase « Ti_8O_{12} », enregistrées sous argon à une vitesse chauffage de 2 K/min (courbes 2A) et 5 K/min (courbes 2B). La perte de masse M (en %) est indiquée en ordonnée, en fonction de la température T (en °C) indiquée en abscisse.

Le produit final pulvérulent obtenu à 400°C, correspond à la variété anatase de TiO_2 , identifiée à partir de son diagramme X de poudre. La réaction de thermohydrolyse, observée aux environs de 150°C (figure 2B), se manifeste sur les courbes TG/DSC par deux pics endothermiques intenses situés à 110°C et 148°C accompagnés d'une rapide perte de masse. La perte de masse expérimentale (55%) est comparable à celle attendue (56%).

Une analyse thermogravimétrique différentielle (DTG) a été effectuée afin de découpler les événements cinétiques de ceux thermodynamiquement contrôlés. L'expérience a consisté, après avoir fixé une rampe de température, à asservir celle-ci à la perte de masse au-delà d'un certain seuil de sorte que la vitesse de montée en température diminue lorsque la perte de masse augmente. Le profil du thermogramme se trouve alors notablement modifié puisqu'il permet de différencier quatre quasi-plateaux (fig. 2A) suggérant l'existence d'intermédiaires réactionnels. Entre chaque plateau les pertes de masse valent successivement 28%, 14%, 7% et 6%.

Exemple 2

30 Préparation de " Ti_8O_{12} "

On a ajouté du carbonate de sodium à une solution aqueuse 5,5 M de $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$ dans des proportions telles que le rapport molaire Ti/Ca soit égal à 4, puis on a introduit le mélange dans une boîte de Pétri placée à température ambiante. On a constaté la formation de cristaux transparents après 48 heures. Les cristaux ont été récupérés comme dans l'exemple 1, puis conservés dans un récipient étanche.

Exemple 3

Préparation d'une solution de "Ti₈O₁₂"

On a préparé une solution aqueuse de "Ti₈O₁₂" dont la concentration en titane [Ti] est de 0,1 M, en introduisant
5 1,8172 g de "Ti₈O₁₂" préparé selon le mode opératoire de l'exemple 1 dans 100 ml d'eau ultrapure. Une fraction de la solution obtenue a été diluée dix fois, pour obtenir une solution dans laquelle la concentration en titane est de 0,01 M.

10 Afin de tester l'influence de la force ionique sur la taille des particules de "Ti₈O₁₂" en solution, des quantités variables de KCl pulvérulent ont été ajoutées. Ces quantités correspondent à l'obtention de solutions dont la concentration en KCl, notée [Cl⁻], est respectivement 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³
15 et 10⁻⁴ M. Les diamètres hydrodynamiques des particules ont été mesurés par spectroscopie de corrélation de photons à l'aide d'un équipement Beckman-Coulter N4 plus. Des solutions polydisperses dans lesquelles les tailles de particules sont distribuées dans plusieurs classes sont obtenues
20 pour [Ti] = 0,1 M, et [Cl⁻] = 10⁻¹ ou 10⁻⁴ M. Des solutions monodisperses sont obtenues pour [Ti] = 0,1 M, et [Cl⁻] = 10⁻² ou 10⁻³ M. Les diamètres hydrodynamiques pour les solutions monodisperses sont indiqués sur la figure 3. Le diamètre hydrodynamique D (en nm) est indiqué en abscisse.
25 Le pourcentage massique P est représenté en ordonnée et les valeurs correspondantes sont indiquées sur les lignes "S 1" et "S 2". La ligne S1 correspond à une concentration en KCl de 10⁻² M et la ligne S2 correspond à une concentration en KCl de 10⁻³ M. Il apparaît que les diamètres sont centrés
30 autour de 2,2 nm. Cette valeur est proche de celle déterminée à partir des données cristallographiques et correspond à un cluster de "Ti₈O₁₂" entouré d'atomes de chlore et de molécules d'eau tel que représenté sur la figure 4.

Exemple 4Réalisation de dépôts de " Ti_8O_{12} " par trempage-retrait sur verre

On a préparé dans un bécher une solution alcoolique de
5 " Ti_8O_{12} " dont la concentration en titane est de 0,35 M, en
introduisant 3,8161 g de " Ti_8O_{12} " dans 60 ml d'éthanol anhy-
dre. Le bécher contenant la solution est placé sur un sup-
port dont la hauteur est ajustable. Une plaque de verre du
type "lame porte-objet de microscope" fixée à l'aide d'une
10 pince est maintenue verticalement au-dessus du bécher. Le
dépôt est réalisé par la technique dite "du trempage
retrait" ou "dip coating" qui consiste à tremper la plaque
de verre dans la solution, puis à la retirer à vitesse cons-
tante. Après trempage, la plaque est séchée à l'air pendant
15 environ 5 min. Cette opération est répétée 5 fois. La plaque
est ensuite placée dans un four dans lequel elle subit un
traitement thermique consistant à faire monter la tempé-
rature en 2 h jusqu'à 300°C, à maintenir cette température
pendant 4 h, puis à laisser refroidir jusqu'à 20°C en 4 h.

20 Le dépôt obtenu sur la plaque de verre se présente sous
forme d'une couche homogène et transparente dont l'épais-
seur, déterminée par microscopie électronique à balayage
(MEB), est de 100 nm. La figure 5 représente l'image MEB
d'une coupe transversale du dépôt. Le diagramme de diffrac-
25 tion X du dépôt, représenté sur la figure 6 présente deux
larges massifs situés autour de 12,7° et 23,7° qui corres-
pondent aux distances inter-réticulaires de " Ti_8O_{12} " amorphe
et deux pics étroits à 16,1° et 31,8° attribuables à une
phase cristallisée non identifiée. Compte tenu des hauteurs
30 respectives des pics, la phase " Ti_8O_{12} " peut être considérée
comme majoritaire. Les distances inter-réticulaires de cette
phase non identifiée, calculées à partir des angles en 2 θ
=16,1° et 31,8° par la relation $2d\sin\theta=n\lambda$, avec $\lambda=1,5418$
(Anticathode de cuivre), sont respectivement de 5,47 Å et de
35 2,82 Å.

Exemple 5

Réalisation de dépôts de "Ti₈O₁₂" par trempage-retrait sur verre

On a préparé une solution alcoolique de "Ti₈O₁₂" dont la concentration en titane est de 0,1 M, en introduisant 1,8172 g de "Ti₈O₁₂" dans 100 ml d'éthanol anhydre. Les dépôts sont réalisés selon la méthode dite du "trempage-retrait" décrite dans l'exemple 4. Après chaque dépôt, la plaque de verre est séchée par un étuvage à 75°C. 5 dépôts ont ainsi été réalisés sur chaque plaque. Afin de tester l'influence d'un traitement thermique sur la structure des dépôts, les plaques de verre ont subi les programmes de température suivants :

Echantillon N°	Traitement thermique		
	Température °C	Vitesse de montée (°C/min)	Durée (heure)
1	75	étuve	1h 30
2	75	2	3
	155	2	4
3	75	2	4
	155	2	4
	200	2	4
4	75	2	4
	155	2	4
	200	2	4
	255	2	4
5	75	2	4
	155	2	4
	200	2	4
	255	2	4
	420	2	4

Le dépôt obtenu sur la plaque de verre a une épaisseur, déterminée par MEB, de 200-250 nm. Sur la figure 7, qui représente l'image MEB d'une coupe transversale du dépôt correspondant à l'échantillon n° 3, la zone claire sensible-

ment verticale au milieu de la figure représente un gel de "Ti₈O₁₂", et la zone sombre à la droite de la figure représente le substrat de verre. Les diagrammes de diffraction de RX sont représentés sur la figure 8. Les courbes correspondent dans l'ordre aux traitements thermiques n° 1, n° 2, n° 3, n° 4 et n° 5, à partir du bas. Les diagrammes montrent les massifs situés autour de 12,7° et 23,7° qui correspondent aux distances inter-réticulaires de "Ti₈O₁₂", ainsi que les raies situées autour de 31,8° (pour les échantillons n° 2 et n° 3) et autour de 16,1° qui correspondent aux distances interréticulaires de 5,47 Å et de 2,82 Å caractéristiques de la phase inconnue obtenue également dans l'exemple 4.

Exemple 6

15 Réalisation de dépôts de "Ti₈O₁₂" sur verre par spin coating

Dans un bécher contenant des cristaux de "Ti₈O₁₂" dissous dans 5 ml d'éthanol, on ajoute, goutte à goutte, à l'aide d'une burette, une solution alcoolique d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAOH) dans le rapport molaire, R =
20 Ti/TMAOH, tel que : $1,5 \leq R \leq 3$. Bien que l'addition de TMAOH soit interrompue avant l'apparition du précipité de dioxyde de titane TiO₂, la solution limpide évolue au cours du temps jusqu'à devenir visqueuse. Aussi, une partie du mélange en solution est déposée rapidement sur le verre par
25 spin-coating". La répartition des dépôts par "spin-coating" se fait par rotation d'un faible volume de solution sur le verre, à vitesse, accélération et durée de rotation contrôlées.

Pour observer l'influence de R sur la taille des grains
30 lors des dépôts sur verre par "spin coating", différentes solutions ont été utilisées. Les quantités de composés utilisées sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

"Ti ₈ O ₁₂ " (g)	TMAOH (g)	R = Ti/TMAOH
0,500	0,3428	1,5
0,500	0,2493	2
0,500	0,1558	3

La photographie MEB, présentée sur la partie gauche de la figure 9, illustre la taille des particules obtenue pour R = 1,5. L'histogramme de répartition de la surface des grains, sur lequel l'aire A en nm est en abscisse, est re-
 5 présenté sur la partie droite de la figure 9. On observe une très bonne homogénéité de la dispersion des particules conduisant à un taux de recouvrement de 8%, avec une surface moyenne de particule de l'ordre de 300 nm², soit un diamètre d'environ 17 nm. La taille des particules diminue lorsque le
 10 rapport Ti/TMAOH augmente, c'est-à-dire lorsque le pH de la solution alcoolique diminue. La réalisation de dépôts sur verre par "spin coating", pour des rapports Ti/TMAOH varia-
 bles en milieu alcoolique, permet d'obtenir des particules monodisperses fortement adhérentes au support et dont les
 15 diamètres peuvent variées de 100 nm à 3 nm.

Exemple 7

Electrodéposition de "Ti₈O₁₂" sur un support métallique

On a préparé une solution alcoolique de "Ti₈O₁₂" dont la concentration en titane est de 0,04 M, en introduisant
 20 0,7269 g de "Ti₈O₁₂" dans 100 ml de méthanol anhydre. Une électrode, constituée par une membrane de type "glass fritt" Whatman de diamètre 25 mm (diamètre de pore 20 nm) recou-
 verte d'une fine pellicule d'or par évaporation sous vide, a ensuite été polarisée à -0,5 V par rapport à une électrode
 25 de référence au calomel, pendant une heure. La quantité de courant passée correspond à 1300 Coulomb. L'analyse EDX au Microscope Electronique à Balayage (MEB) révèle un rapport proche Ti/Cl = 4 soit 80% en titane. L'image MEB représen-
 tée sur la figure 10 indiquent un dépôt relativement
 30 uniforme constitué d'un agglomérat de grains de diamètre 10 nm délimitant des pores d'environ 10 nm à 20 nm de diamètre.

Compte tenu du rapport $Ti/Cl = 4$, 75% du titane est sous forme de TiO_2 , le reste étant sous forme de " Ti_8O_{12} ".

Exemple 8

On a préparé une solution alcoolique de " Ti_8O_{12} " dont la
5 concentration en titane est de 0,01 M, en introduisant
0,1817 g de " Ti_8O_{12} " dans 100 ml de méthanol anhydre. Une
électrode, constituée par une membrane de type "glass fritt"
Whatman de diamètre 25 mm (diamètre de pore 20 nm) recou-
verte d'une fine pellicule d'or par évaporation sous vide, a
10 ensuite été polarisée à -0,2 V par rapport à une électrode
de référence au calomel, pendant 6 heures. La quantité de
courant passée correspond à 1750 Coulomb. L'analyse EDX au
Microscope Electronique à Balayage (MEB) révèle un rapport
proche $Ti/Cl = 82/18$. Compte tenu du rapport Ti/Cl 78% du
15 titane est sous forme de TiO_2 , le reste étant sous forme de
" Ti_8O_{12} ".

L'image de MEB représentée sur la figure 11 révèle la
structure poreuse du dépôt.

Exemple 9

20 L'activité photocatalytique du dépôt réalisé selon
l'exemple 4 est mesurée à l'aide d'un test de dégradation du
méthanol en phase gazeuse. Un volume de 6 mL d'air saturé en
méthanol à 16,3°C, qui correspond à une concentration de 500
ppm, est introduit dans le réacteur à l'aide d'une seringue
25 à gaz. L'ensemble est maintenu à l'obscurité pendant 2 à 3 h
afin d'atteindre un équilibre, puis soumis à une irradiation
UV ($\lambda=360nm$). On observe une diminution de la concentration
de méthanol de 515 ppm à 440 ppm en 6 h ce qui correspond à
une vitesse initiale de dégradation de 12,5 ppm h^{-1} .

30 Les résultats de l'activité photocatalytique du dépôt
sont présentés sur la figure 12. Les points barrés d'un
trait vertical représentent l'évolution en fonction du temps
de la concentration en méthanol (valeur M en unités arbi-
traires sur l'axe de gauche) et les points non barrés repré-
35 sente l'évolution en fonction du temps de la concentration
en CO_2 (valeur C en unités arbitraires sur l'axe de droite).

Les différentes zones indiquées sur la figure correspondent aux paramètres testés. La zone notée "Obs" correspond à la mise en équilibre, les deux zones "UV" correspondent à l'irradiation UV, la zone "UV+H₂O" correspond à une irradiation UV et une injection de H₂O, la zone "Obs+H₂O" correspond à une mise en équilibre avec injection de H₂O.

Revendications

1. Procédé de préparation d'aquo-oxo chlorure de titane caractérisé en ce qu'il consiste à hydrolyser TiOCl_2 soit dans une atmosphère dont le taux d'humidité est maintenu entre 50 et 60%, soit par un carbonate alcalin A_2CO_3 .
- 5 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que TiOCl_2 est sous forme d'une solution aqueuse $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que la concentration en HCl de la solution est d'environ
10 2 M.
4. Procédé selon la revendication 2, caractérisée en ce que la concentration en $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$ est entre 4 M et 5,5 M.
5. Procédé selon la revendication 2, caractérisée en
15 ce que la solution de $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$ est placée à température ambiante au dessus d'un mélange $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ dans des quantités respectives telles que l'humidité relative est de l'ordre de 50 à 60% et laissée en contact pendant environ 5 semaines.
6. Procédé selon la revendication 1, caractérisée en
20 ce que l'on met en présence à température ambiante une solution $\text{TiOCl}_2 \cdot y\text{HCl}$ et un carbonate alcalin A_2CO_3 dans des quantités respectives telles que le rapport $\text{Ti}/\text{A} = 4 \pm 0,5$, et on laisse en contact pendant 48 à 72 heures.
7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en
25 ce que $\text{Ti}/\text{A} = 4 \pm 0,1$.
8. Aquo-oxo chlorure de titane sous forme de cristaux ayant la composition massique suivante : Ti 26,91%, Cl 21,36%, H 4,41%, qui correspond à la formule $[\text{Ti}_8\text{O}_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24}]\text{Cl}_8 \cdot \text{HCl} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, caractérisé en ce qu'il présente
30 une structure monoclinique, des paramètres de la maille monoclinique $a = 20,3152(11) \text{ \AA}$, $b = 11,718(7) \text{ \AA}$, $c = 24,2606(16) \text{ \AA}$, $\beta = 111,136(7)^\circ$, et le groupe de symétrie Cc.
9. Aquo-oxo chlorure de titane sous forme de cristaux selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il est formé
35 de particules monodisperses dans un solvant polaire.

10. Aquo-oxo chlorure de titane selon la revendication 9, caractérisé en ce que lesdites particules ont un diamètre hydrodynamique centré autour de 2,2 nm.

11. Aquo-oxo chlorure de titane selon la revendication 5 8, caractérisé en ce qu'il est sous forme de film mince sur un substrat.

12. Aquo-oxo chlorure de titane selon la revendication 11, caractérisé en ce que le substrat est du verre.

13. Élément semi-conducteur, caractérisé en ce qu'il 10 est constitué par un aquo-oxo chlorure de titane selon l'une des revendications 11 ou 12.

14. Procédé de purification de l'air par photocatalyse, caractérisé en ce que le catalyseur est un aquo-oxo chlorure de titane selon l'une des revendications 11 ou 12.

15 15. Procédé de purification de d'effluents aqueux par photocatalyse, caractérisé en ce que le catalyseur est un aquo-oxo chlorure de titane selon l'une des revendications 11 ou 12.

Fig. 1

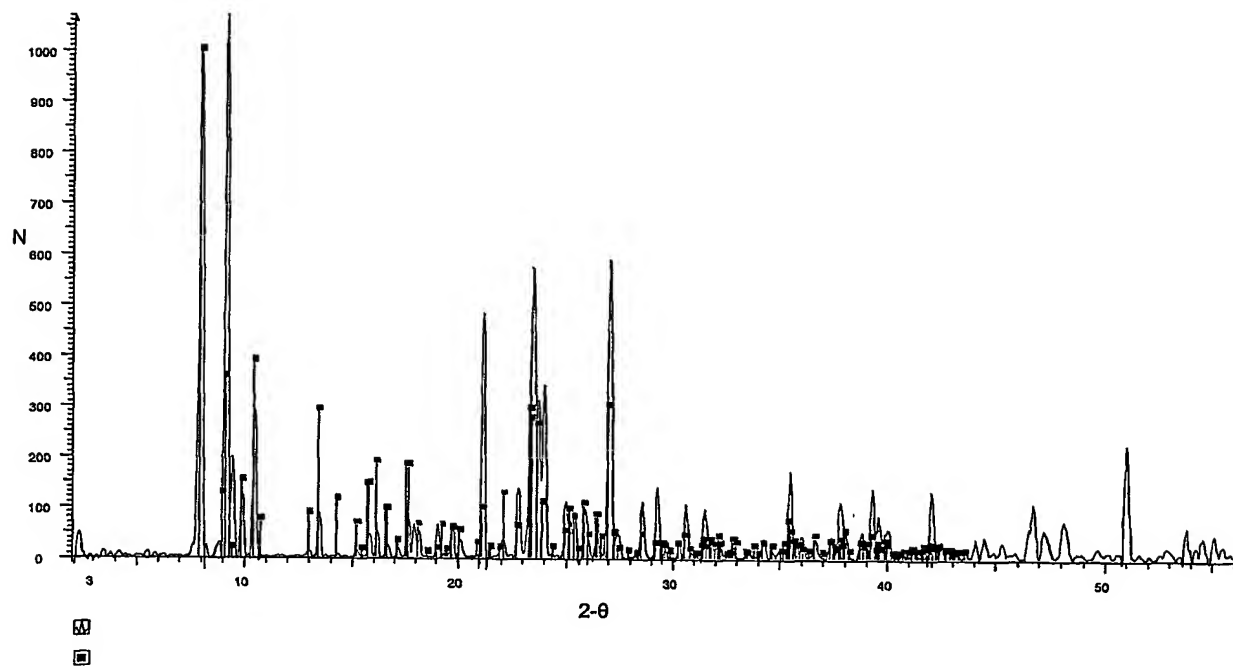


Fig. 2

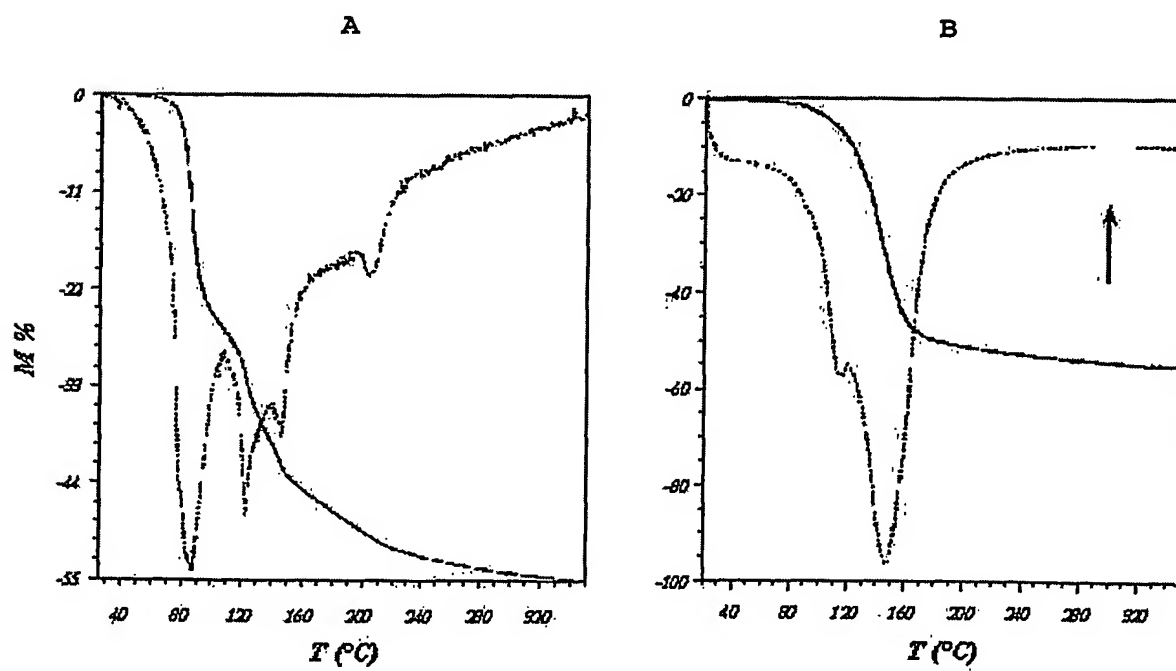


Fig. 3

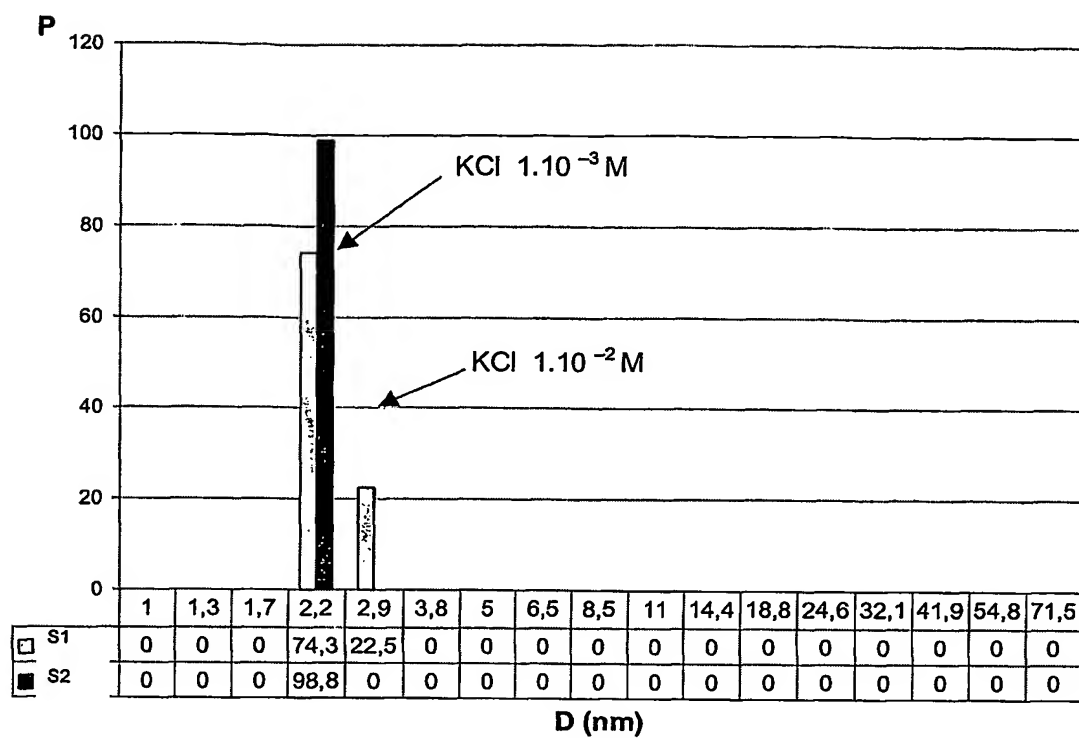
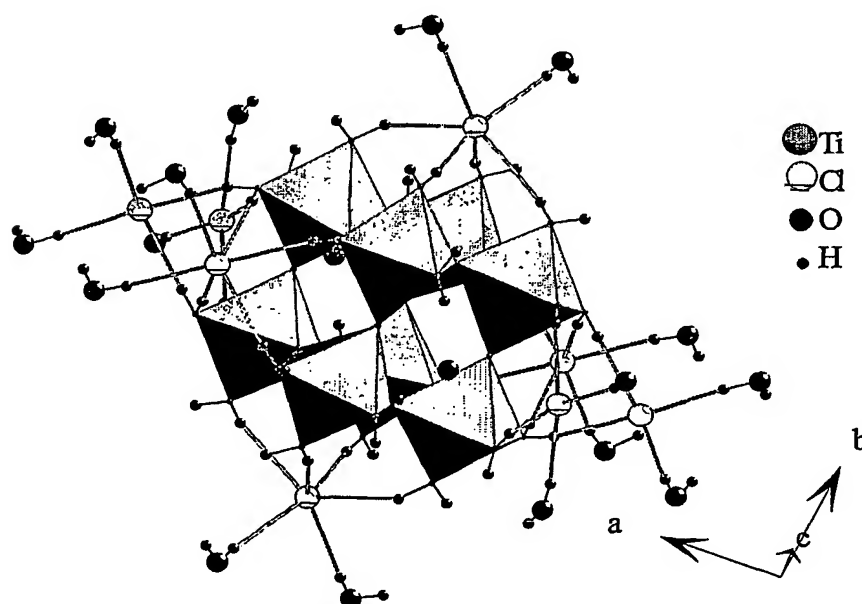
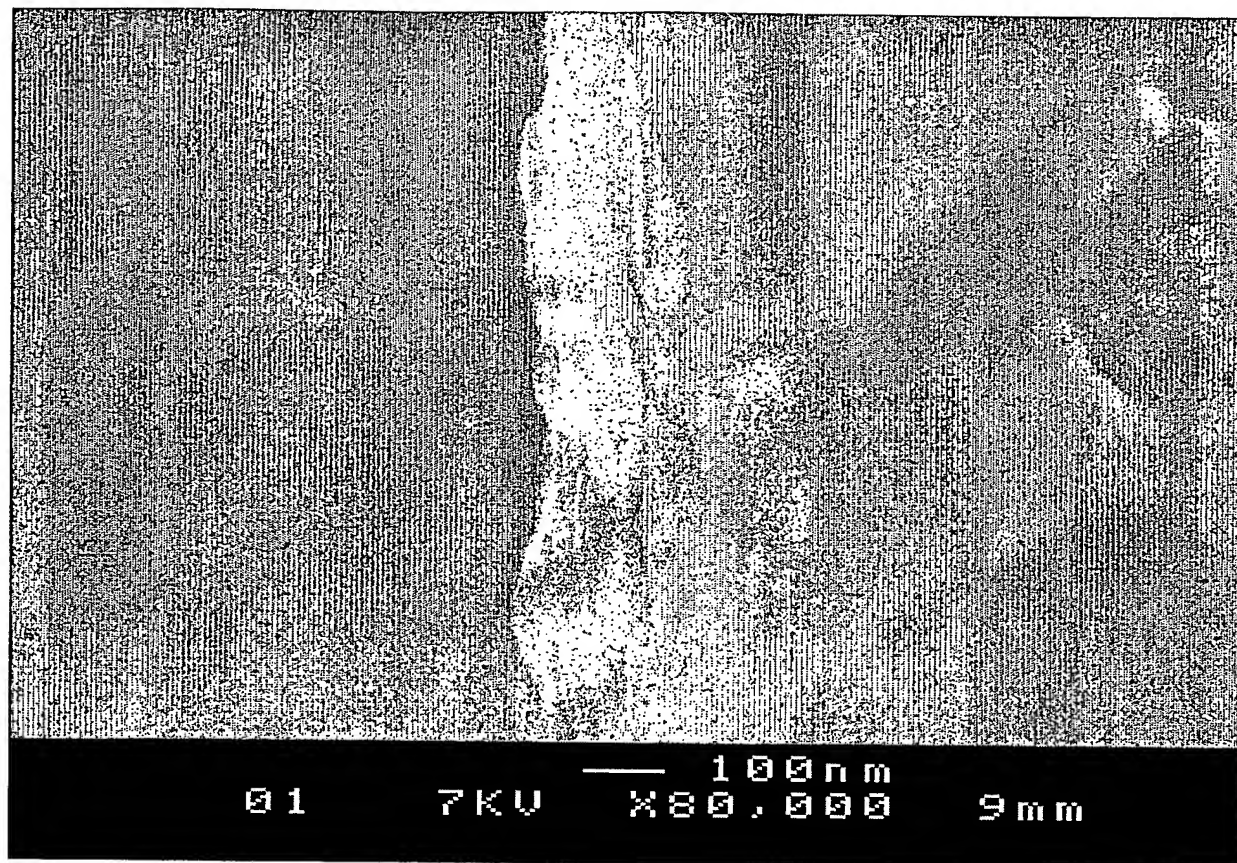


Fig. 4



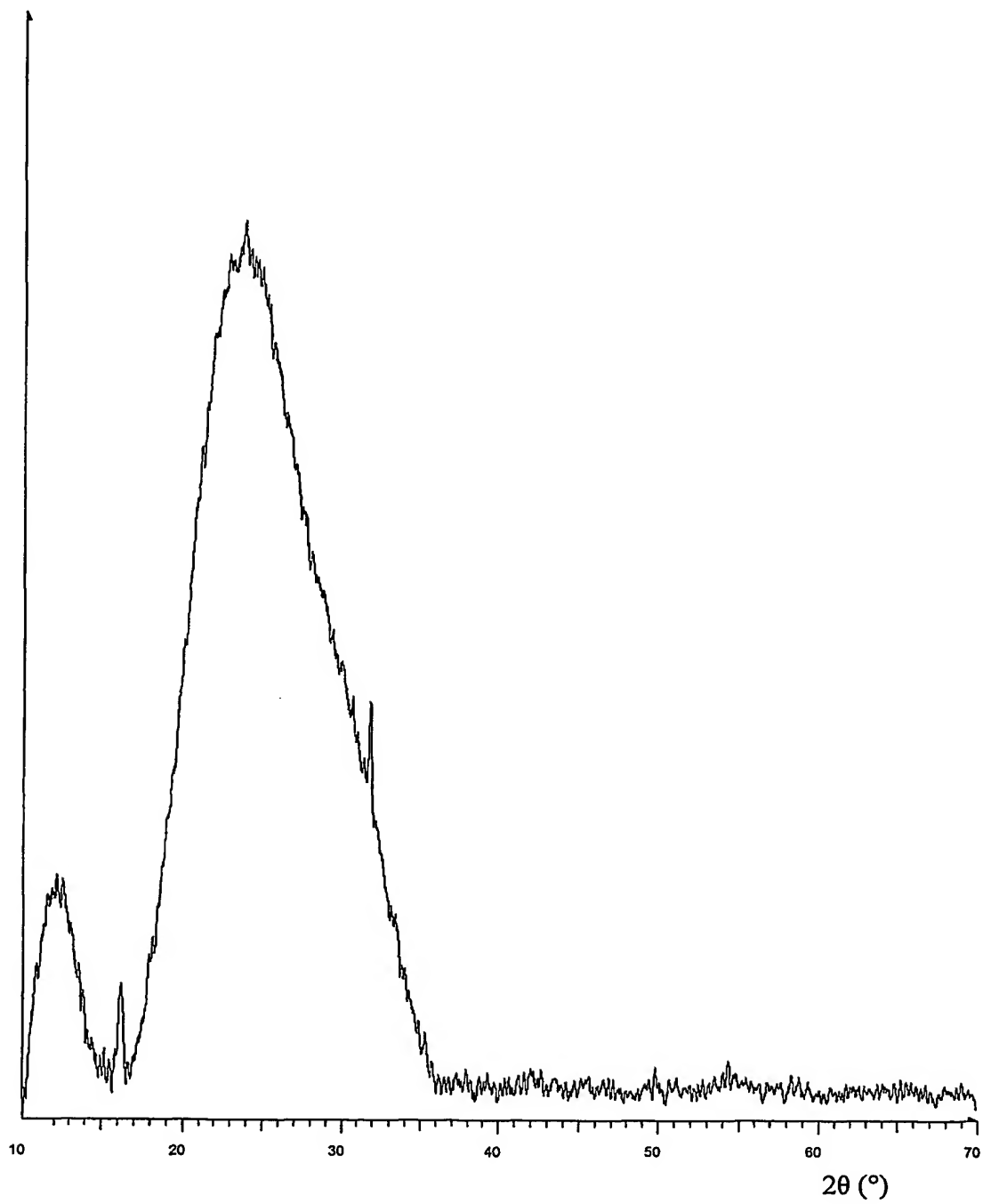
3 / 7

Fig. 5



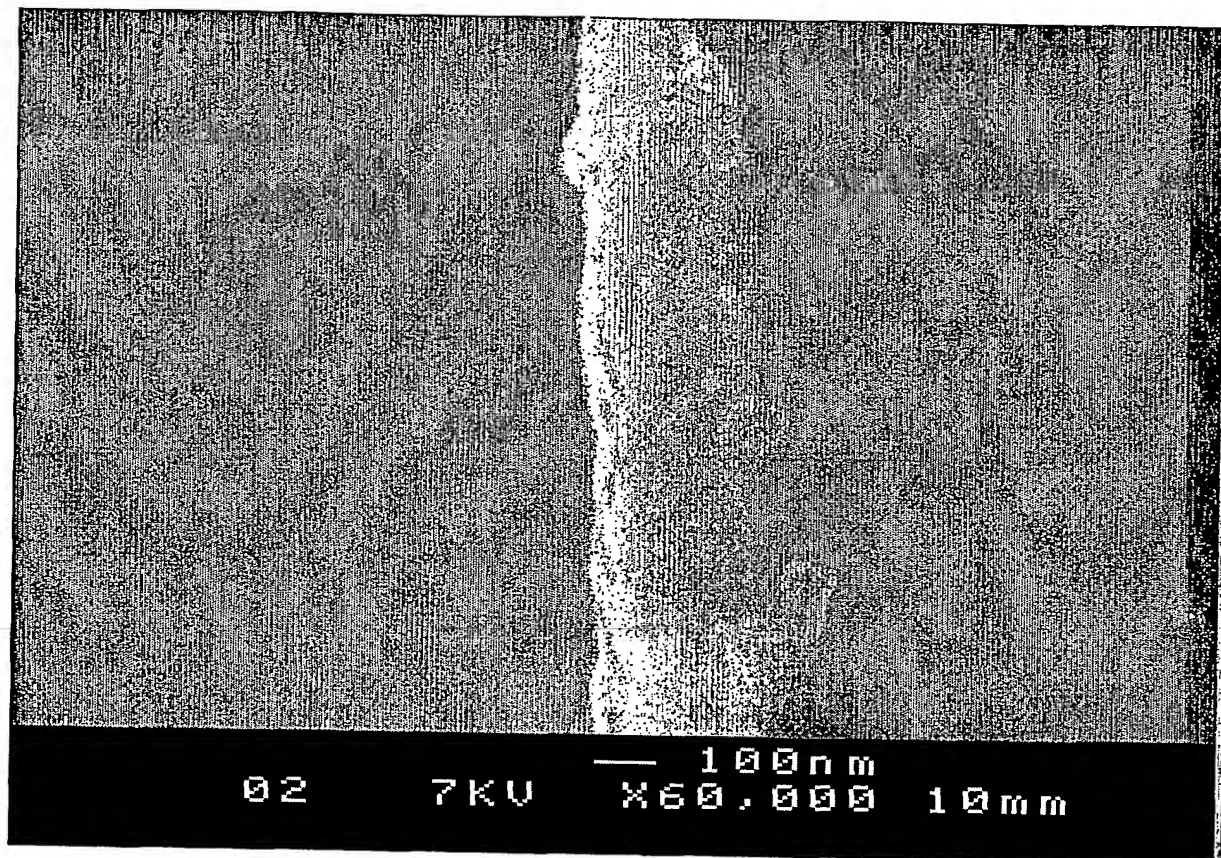
4 / 7

Fig. 6



5 / 7

Fig. 7



6 / 7

Fig. 8

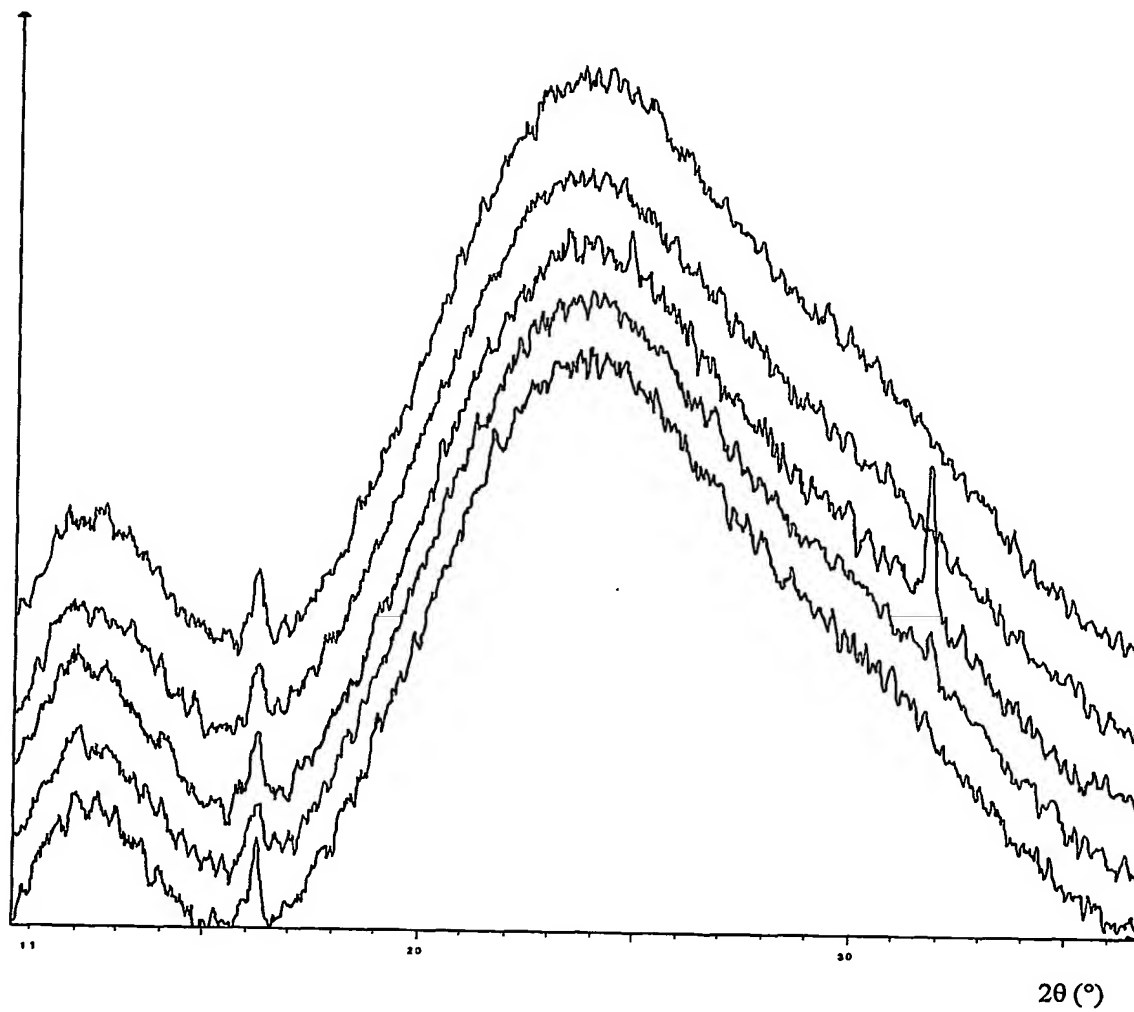


Fig. 9

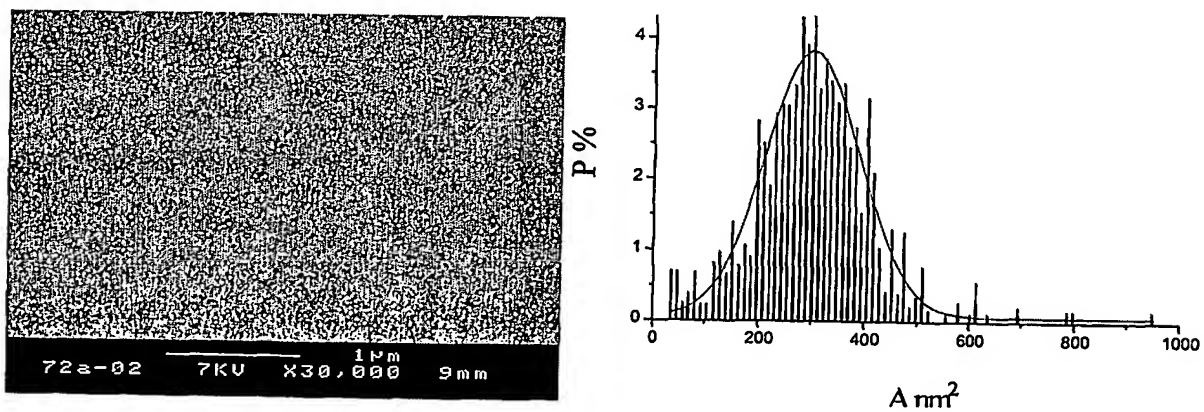


Fig. 10

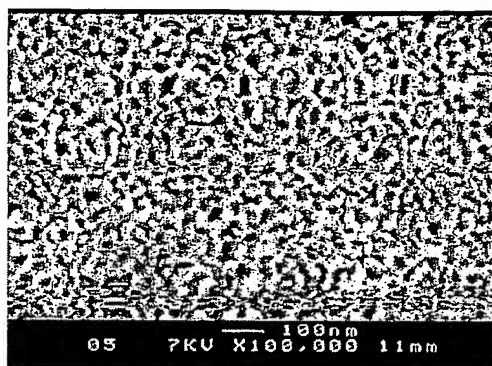


Fig. 11

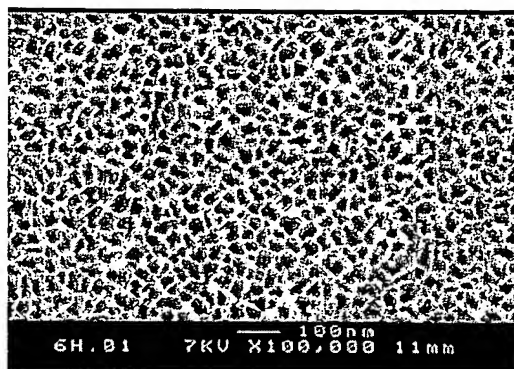


Fig. 12

